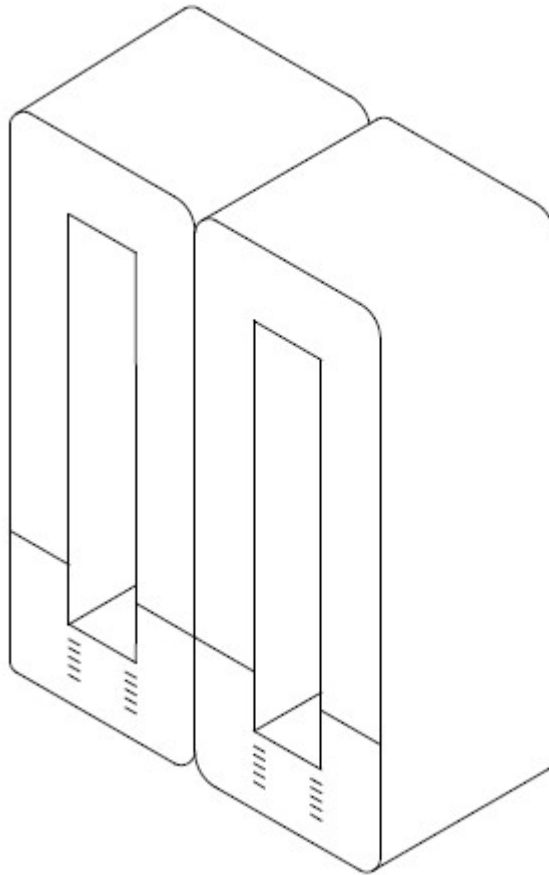


Análisis y desarrollo de transformadores de distribución con núcleo amorfo



Katherine Lizet Marulanda Córdoba
Milton Johany Orrego Giraldo

Análisis y desarrollo de transformadores de distribución con núcleo amorfo

Katherine Lizet Marulanda Córdoba
Milton Johany Orrego Giraldo

Trabajo de grado presentado como
requisito parcial para optar al título
de Ingeniero Electricista

Pereira, Diciembre de 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA



Análisis y desarrollo de transformadores de distribución con núcleo amorfo

© Katherine Lizet Marulanda Córdoba y Milton Johany Orrego Giraldo

Directora: Sandra Milena Pérez Londoño

Pereira, diciembre de 2017

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira. La Julita. Pereira (Colombia)

TEL: (+57) (6)3137122

[www.utp.edu.co](http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html) Versión web disponible en: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>

Agradecimientos

Primero que todo, agradecemos a Dios por permitirnos culminar una etapa tan importante en nuestras vidas, a nuestros padres por ser quiénes pusieron todo de su parte para formar personas de bien, con valores y principios, quiénes nos ensaaron que lo único que se puede heredar es la educación.

Agradecemos a nuestras familias y amigos, por el apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto; ellos siempre fueron esa voz de aliento para culminar esta etapa.

Nos agradecemos mutuamente, somos compañeros incansables de lucha, de perseverancia y tolerancia. Siempre darlo todo sin desfallecer.

Agradecemos a la Ingeniera Sandra Milena Pérez Londoño por toda su dedicación y orientación durante el desarrollo de este proyecto, gracias por su tiempo y paciencia.

Resumen

Dadas las características que presentan los núcleos de transformadores construidos con láminas de material amorfo, comparadas con las obtenidas cuando se emplea lámina de acero al silicio, en cuanto al bajo nivel de pérdidas en vacío, menores corriente de excitación, entre otras, en este trabajo de grado, se realiza un análisis de la viabilidad técnica y económica, de la construcción de transformadores de distribución monofásicos, de núcleo amorfo, que cumplan con los niveles de eficiencia que impone la normatividad internacional. El desarrollo de este proyecto consta de dos etapas: una teórica, donde se plantea el análisis económico, en donde no sólo se evalúa el costo inicial del equipo (materia prima como parte activa, accesorios, tanque, aceite y valor de la mano de obra), sino también la capitalización de las pérdidas en el tiempo, de acuerdo a factores de evaluación, con el fin de demostrar las ventajas de la lámina amorfa frente a la lámina convencional. La etapa práctica, consiste en el diseño y construcción de prototipos de transformadores monofásicos de 37,5 kVA y 75 kVA (13200 – 120/240) V de lámina amorfa, que contemplan entre otras restricciones, los valores de eficiencia definidas por normas y la configuración geométrica de los lazos de núcleo entregados por el proveedor. Finalmente, el análisis se complementa con los ensayos realizados en el laboratorio a los prototipos construidos, donde se validan entre otros resultados, que la construcción de núcleos amorfos en transformadores, permite alcanzar altos niveles de eficiencia que se ajustan a la normatividad vigente, dadas los bajos niveles de pérdidas que se obtienen.

Tabla de Contenido

1	Introducción general.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Plantamiento del problema.....	1
1.3	Justificación.....	2
1.4	Objetivos.....	3
1.4.1	Objetivo general.....	3
1.4.2	Obejetivos específicos.....	3
1.5	Aportes del trabajo.....	4
1.6	Estructura del trabajo de grado.....	4
2	Marco teórico y estado del arte.....	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	Transformador de distribución.....	5
2.2.1	Parte activa.....	5
2.2.2	Accesorios.....	8
2.2.3	El núcleo.....	9
2.3	Estado del arte.....	12
3	Capítulo 3. Análisis de costos y estudio de mercado	16
3.1	Introducción.....	16
3.2	Análisis de mercado.....	16
3.3	Evaluación de costo materia prima y evaluación de pérdidas.....	18
3.4	Costos de operación de transformadores en acero al silicio vs transformadores en material amorfo.....	22
3.5	Análisis de importación de la materia prima y despacho de los transformadores.....	25
4	Capítulo 4. Diseño de prototipos en material amorfo.....	27
4.1	Introducción.....	27
4.2	Adquisición del material.....	27
4.3	Forma constructiva y dimensiones.....	28
4.4	Parámetros eléctricos de los transformadores.....	32
4.5	Selección de los lazos.....	33
5	Capítulo 5. Proceso de ensamble de la parte activa.....	35
5.1	Introducción.....	35

5.2	Recepción del material.....	35
5.3	Criterios para el ensamble.....	37
5.4	Criterios para aterrizaje del núcleo.....	39
5.5	Diseño de la brida.....	41
6	Capítulo 6. Pruebas de rutina.....	42
6.1	Introducción.....	42
6.2	Resultados pruebas de rutina.....	42
7	Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.....	46
7.1	Conclusiones.....	46
7.2	Trabajos futuros.....	47
	Bibliografía.....	48

Capítulo 1

Introducción general

1.1 Introducción

El avance tecnológico ha llevado a la industria de transformadores a reinventarse, a buscar nuevas soluciones, no sólo en la optimización de los recursos, sino en el uso de nuevos materiales, con mejores eficiencias, que no solo harán del transformador un producto que cumpla con los mejores estándares de calidad, sino que también contribuya con la sostenibilidad del medio ambiente.

Es por esto que el mejoramiento continuo de los materiales que se emplean en el proceso de fabricación del transformador, ha permitido alcanzar mejores características en dichos equipos, que no solo contribuyen al desarrollo energético de la sociedad, sino que también pueden reducir sus emisiones de dióxido de carbono, gracias a la reducción de sus pérdidas. Respecto al material que se emplea en la construcción del núcleo del transformador, desde la década de los 80's surge una aleación de hierro, boro y silicio, denominada material amorfo, que comparativamente con las láminas convencionales, como la de acero al silicio de grano orientado, logra reducir las pérdidas en vacío casi un 70%.

En este trabajo de grado, se analiza el impacto económico que se obtiene al emplear transformadores con núcleos de material amorfo, especialmente en la evaluación de pérdidas, además de definir la viabilidad técnica durante el ensamble de este material, demostrado a través de resultados que se obtienen a partir de prototipos monofásicos convencionales.

1.2 Planteamiento del Problema

En el diseño y construcción de transformadores eléctricos se emplean núcleos magnéticos, cuya función principal consiste en confinar el flujo que se genera debido a la circulación de corrientes por las bobinas que envuelven al núcleo. Generalmente, el núcleo de un transformador de distribución o potencia, se construye a partir de una aleación típica de acero al silicio, en la cual, sus partículas se encuentran en un orden atómico determinado (grano

orientado). El proceso que actualmente se emplea para construir estos núcleos, permite un rápido ensamble de la parte activa (Bobinas – Núcleo) sin representar mayor complejidad a través de la experiencia adquirida por los fabricantes de transformadores. Sin embargo, desde el punto de vista eléctrico - económico, el uso de núcleos con material convencional (acero al silicio), implica obtener pérdidas en vacío relativamente altas, comparadas con otros materiales, que a la larga afectan el rendimiento del equipo.

Cuando una empresa desea ingresar a nuevos mercados, debe considerar las exigencias técnicas que estos le imponen. Esto conlleva a que la compañía se vea obligada a desarrollar nuevos productos que se ajusten a dichos requerimientos, logrando así innovación en los diseños y en las formas de producción. Una de las exigencias que más impacta la fabricación del transformador está relacionada con las pérdidas en vacío, las cuales en los nuevos mercados (como el de Estados Unidos) desde el punto de vista técnico, son considerablemente bajas en comparación, a las exigidas por otros mercados, a los cuales las empresas nacionales distribuyen actualmente. Por esta razón, para algunas de estas empresas, ha sido importante analizar la viabilidad de emplear otro tipo de material alternativo al acero al silicio en la construcción del núcleo, que permita alcanzar dichos mercados. Actualmente, la investigación en dicha área se ha convertido en un objetivo importante para el desarrollo futuro de estas compañías.

El uso de otro material para la construcción del núcleo, podría permitir una disminución considerable de las pérdidas en vacío, tal es el caso del material amorfo, que ha sido empleado en otros países como EEUU, Japón, India, entre otros. Sin embargo, se desconocen las implicaciones que tendría el uso de material amorfo a nivel local o nacional, así como también desde el punto de vista técnico, en cuanto a tiempos de ensamble, complejidad en la manipulación, variación en los factores de destrucción y resultados en sus pruebas de rutina y pruebas tipo. También es importante analizar que el uso de este material implica una inversión inicial relativamente alta para el cliente o usuario final, pero con unos costos de operación más bajos. Todas estas variables son susceptibles de ser analizadas y requieren un estudio para comprobar la viabilidad de emplear núcleos amorfos.

1.3 Justificación

Dada la necesidad por parte de diversas compañías de incursionar en nuevos mercados con productos más competitivos, se pretende desarrollar esta investigación, analizar y documentar el proceso de diseño y ensamble de núcleos amorfos en transformadores monofásicos tipo acorazados. Para estas empresas, es de vital importancia desarrollar este

nuevo producto y establecer métodos eficientes de ensamble y fabricación, así como también definir criterios de diseño y validación en pruebas eléctricas, las cuales hasta el momento no están establecidas en el país.

Los resultados de este trabajo, permitirían la fabricación de transformadores con menores pérdidas eléctricas, algo que significaría un menor impacto ambiental, además de la posibilidad que tendrían las compañías de competir en otros mercados.

El presente proyecto comprende dos etapas, una etapa económica, que incluye el estudio de viabilidad de mercado para el nuevo producto y una etapa técnica, que va desde el diseño hasta la validación, mediante ensayos de un prototipo monofásico, construido con material amorfo.

1.4 Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica y económica del diseño de prototipos de transformadores monofásicos con núcleo tipo acorazado (*shell type*) en material amorfo.

1.4.1 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte relacionado con el uso de material amorfo en transformadores.
- Definir criterios técnicos de diseño para la fabricación de transformadores monofásicos con núcleo de material amorfo tipo acorazado.
- Establecer una metodología de ensamble del núcleo, que permita una correcta manipulación del material amorfo, con el fin de disminuir o mantener el factor de destrucción en niveles bajos.
- Implementar el desarrollo de prototipos monofásicos de material amorfo en el área productiva de una empresa.
- Validar el diseño de los prototipos mediante los resultados obtenidos en pruebas de rutina.

- Analizar la viabilidad económica de la fabricación y venta de transformadores monofásicos con núcleo de material amorfo tipo acorazado.

1.5 Aportes del trabajo

Se determina el impacto del material amorfo en la fórmula de evaluación de pérdidas, para eventuales estudios de mercado, así mismo se validan facilidades de ensamble para núcleos de material amorfo. Además de considerar que el análisis no se limita a ser de carácter académico, sino también práctico, al fabricar dos prototipos a los cuales se les realizan pruebas de rutina y se obtienen resultados reales.

1.6 Estructura del trabajo de grado

El documento se encuentra estructurado de la siguiente forma: En el capítulo 2 se presenta el marco teórico del proyecto donde se mencionan algunas características del material amorfo y se recopila información del estado del arte a partir de artículos especializados de las bases de datos de la IEEE, información técnica suministrada por el proveedor de la lámina amorfa por medio de catálogos y otros proyectos y tesis relacionados con el estudio de núcleos en material amorfo. Posteriormente, en el capítulo 3 se analiza la viabilidad de los prototipos bajo criterios de demanda y estudio de mercado, además de analizar la normatividad bajo la cual pueden ser diseñados dichos transformadores. En el capítulo 4, se establecen criterios de diseño para el transformador, según dimensiones estándar de los núcleos o lazos ofrecidos por el proveedor de la lámina y se establecen los parámetros finales con los cuales deberán cumplir dichos transformadores. En el capítulo 5 se inspeccionan los lazos de material amorfo y se estructura el proceso para un correcto ensamble. Luego, en el capítulo 6 se presentan los resultados de las pruebas de rutina realizadas a los prototipos construidos. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las principales conclusiones de acuerdo a los resultados obtenidos y se plantean algunas propuestas para trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1 Introducción

Al analizar la importancia del transformador de distribución como parte de la cadena energética, se hace necesario, para este proyecto entender sus características y fenómenos eléctricos asociados.

2.2 Transformador de distribución

Es un equipo electromecánico que permite transportar la energía de un circuito de distribución primario a un circuito de distribución secundario o consumidor final. Los transformadores de distribución pueden encontrarse en el rango de 5 a 500 kVA [1].

2.2.1 Parte activa

La parte activa del transformador está compuesta por tres elementos básicos:

- a) Bobina: Corresponde a los devanados o enrollados, donde el devanado primario se encarga de generar un flujo magnético en el núcleo. Este flujo induce una fuerza electromotriz al devanado secundario, que aplicado a la carga, da como resultado una corriente de salida. Estos devanados pueden construirse en cobre o aluminio. Su forma constructiva también puede variar de acuerdo a las exigencias del diseño o según las características eléctricas que se deseen lograr, es el caso de las bobinas circulares o rectangulares.

La forma en la que se enrollan las capas de cada devanado son:

- Devanados en dos operaciones: Consta de un primer devanado (el más cercano al núcleo, corresponde al devanado de baja tensión) y posteriormente se enrolla el devanado secundario (devanado de mayor tensión). Tal como se muestra en la figura 2.1:

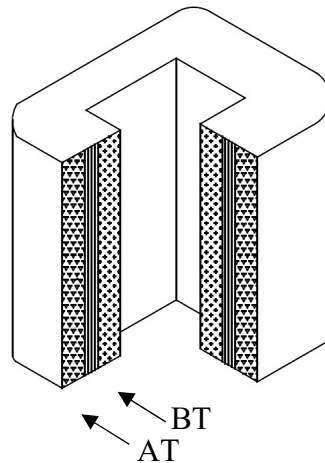


Figura 2.1 Forma constructiva de bobina en dos operaciones

Donde, *AT* hace referencia al devanado de alta tensión y *BT* representa el devanado de baja tensión.

- Devanados en tres operaciones: Consiste en enrollar una parte del devanado de baja tensión, posteriormente se enrolla el devanado de alta tensión y finalmente se añade el faltante de baja tensión. Esta forma constructiva es poco usual y generalmente, se emplea en casos donde se pretende obtener valores de impedancia bajos, respecto a una bobina con devanados en dos operaciones.

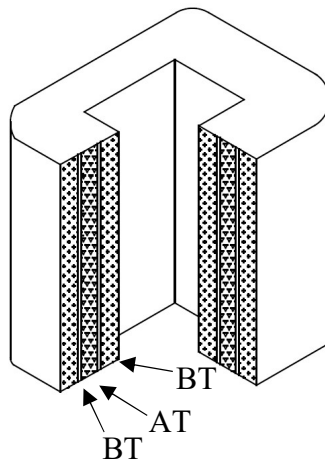


Figura 2.2 Forma constructiva de bobina en tres operaciones

Donde, *AT* hace referencia al devanado de alta tensión y *BT* representa el devanado de baja tensión.

Es importante mencionar que, en la actualidad, las electrificadoras deben considerar un sin número de variables que permita instalar transformadores en las redes de distribución de forma segura y eficiente. El empleo de devanados ya sea en cobre o aluminio es un factor determinante para la instalación final. La diferencia en densidad de corriente entre ambos materiales permitiría obtener un diseño más eficiente (es decir con menores pérdidas) con cobre, pero así mismo más costoso. También se consideran algunos factores culturales de la población en la cual será instalado el equipo, ya que es de conocimiento general que el cobre como material de fabricación de un transformador, tiene un alto valor comercial en el mercado negro y es allí donde las electrificadoras deciden solicitar transformadores con devanados en aluminio y disminuir el atractivo que los transformadores tienen para la delincuencia.

b) Núcleo: Es un elemento diseñado para acoplar magnéticamente el devanado primario y secundario. En la actualidad, existe una gran variedad de materiales con los cuales es posible seleccionar el tipo de lámina deseada para la fabricación del núcleo, esto depende de la relación costo en comparación con las pérdidas a garantizar. Las formas constructivas del núcleo se pueden presentar en diferentes configuraciones, las más típicas son:

- Núcleo tipo acorazado “*shell type*”: En esta configuración el núcleo abraza a las bobinas, el cual se puede observar en la figura 2.3.

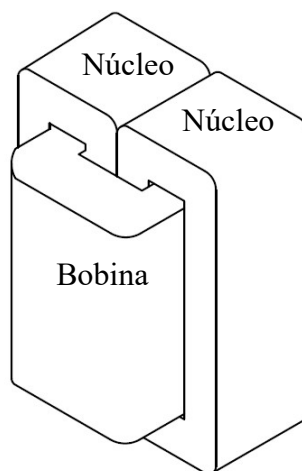


Figura 2.3 *Shell type*

- Núcleo tipo columna “*core type*”: En esta configuración las bobinas abrazan al núcleo. Como se indica en la figura 2.4.

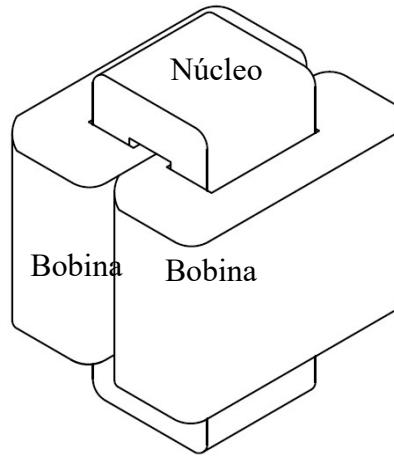


Figura 2.4 *Core type*

- c) Brida: Permite fijar mecánicamente la bobina y el núcleo al tanque, además confina el efecto resonante en la parte activa.

2.2.2 Accesorios

Además de la parte activa, en los transformadores de distribución, se debe tener en cuenta el aceite, el tanque y los siguientes accesorios:

- Aceite dieléctrico: Este líquido cumple con dos funciones esenciales para la parte activa, la primera, actúa como material dieléctrico entre las partes vivas al interior del tanque o cuba, la segunda, es operar como líquido refrigerante, al ayudar a la parte activa a transferir el calor generado por las bobinas y el núcleo hacia las paredes del tanque y este a su vez hacia el medio convectivo. Existen diferentes tipos de aceite: aceite mineral inhibido, aceite mineral no inhibido, aceite vegetal y aceite sintético.
- Tanque o cuba: Allí se ubica la parte activa, la cual se protege de agentes externos y disipa el calor a través de la superficie de la lámina del tanque y los radiadores.
- Bujes en alta y baja tensión (pasatapa, aislador pasante): Dispositivo que permite a uno o varios conductores pasar a través de un obstáculo (por ejemplo, una pared o un tanque) de manera que aisle los dos medios e impida cualquier contacto entre éstos.

El medio de fijación (rebordes o dispositivos de fijación) al obstáculo forma parte del buje [20].

- Conmutador: También llamado cambiador de tensión o cambiador de derivaciones, permite al usuario variar el número de espiras y como consecuencia, se obtiene una variación en la relación de transformación deseada. Este se encuentra conectado en casi todos los transformadores en el devanado de alta tensión. Su selección se realiza según corriente, BIL y número de posiciones o derivaciones deseadas.
- Válvula de sobrepresión: Permite liberar la presión contenida en el tanque cuando el aceite dieléctrico se expande o aumenta en forma considerable su volumen, producto de una falla al interior del transformador.

Además de los elementos antes mencionados existen otros accesorios que se deben instalar de acuerdo a cada caso particular, como lo son los soportes al poste, los soportes para izar el tanque, la válvula de llenado, la válvula de drenaje, entre otros, que algunos clientes solicitan de acuerdo a la instalación final del transformador.

2.2.3 El núcleo

En el núcleo es necesario prestar atención a múltiples variables que juegan un rol importante en la parte activa de un transformador y dependen del tipo de material empleado. A continuación, se presentan las propiedades del material amorfo y el acero al silicio:

- Propiedades magnéticas del acero al silicio: En el mercado de láminas con propiedades magnéticas, el acero al silicio es quizá la de mayor éxito pues es la preferida por muchos fabricantes de transformadores ya que su composición química permite a la lámina llegar a inducciones más allá de los 17000 Gauss. Sin embargo, las pérdidas alcanzadas con lámina en acero al silicio son altas respecto a nuevos materiales que se desarrollan en la actualidad. Otra consideración, es que el acero al silicio tiene excelentes propiedades de magnetización debido a su alta permeabilidad magnética relativa μ_r .
- Propiedades mecánicas del acero al silicio: Esta lámina se encuentra en espesores que van desde 0,20 mm hasta 0,50 mm. Su estructura molecular de grano orientado al igual que otros metales permite al flujo dispersarse en la lámina en sentido lineal. A pesar de su maleabilidad, esta lámina es de fácil manipulación.

Para el caso donde se emplea lámina de material amorfo se encuentra lo siguiente:

- Propiedades magnéticas del material amorfo: Tiene una sorprendente capacidad para alcanzar la magnetización rápidamente ya que su permeabilidad relativa es casi 5 veces mayor a la del acero al silicio. Sus propiedades moleculares en grano no orientado o también conocido como estructura no cristalina, logran que el flujo se disperse de forma no lineal, lo que reduce altamente las pérdidas eléctricas por histéresis, debido a la poca resistencia que ofrece al tránsito del flujo magnético como se observa en figura 2.5 y 2.6:

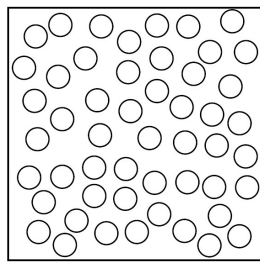


Figura 2.5 Estructura molecular en lámina amorfa

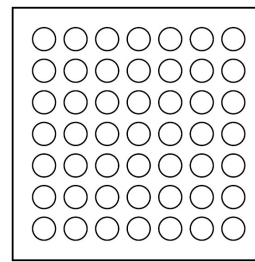


Figura 2.6 Estructura molecular en acero al silicio

- Propiedades mecánicas del material amorfo: Su alta flexibilidad permite manipular la lámina en un rango bastante amplio, sin embargo, resulta ser una desventaja al emplearla en transformadores, pues se considera que el ensamble puede llegar a ser más complejo. Así mismo, su dureza es alta, ya que el material amorfo se clasifica como uno de los elementos más duros después del diamante, aproximadamente 5 veces por encima del acero al silicio. Además, esta lámina cuenta con otra ventaja que favorece las pérdidas en vacío, su espesor, pues actualmente se comercializa en espesores de 0,025 mm, lo cual es una diferencia visible respecto a la lámina en acero al silicio, la cual alcanza un espesor de 0,23 mm. Esta nueva característica permite reducir en forma considerable las pérdidas por flujos o corrientes parásitas confinadas en la sección transversal de la lámina.
- Algunos fenómenos asociados al núcleo:
 - **Magneto-estricción:** Se denomina magnetoestricción a la propiedad de los materiales ferromagnéticos que alteran su longitud al encontrarse en presencia de un campo magnético. La variación va del orden de 10^{-7} a 10^{-5} metros por cada metro

de longitud, dentro de los niveles típicos de densidad de flujo magnético que se emplea en los núcleos. [2].

- **Ferro-resonancia:** Es un fenómeno usualmente caracterizado por sobretensiones y/o sobrecorrientes con formas de onda irregulares, el cual se relaciona con la excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia. La ferro-resonancia puede darse para una configuración serie o una configuración en paralelo (modelo del transformador) de las capacitancias e inductancias saturables [3].

- **Pérdidas en un transformador**

Las pérdidas eléctricas del transformador son la suma total de las pérdidas en vacío y bajo carga, las cuales según la NTC 317 de 1998, se definen de la siguiente forma:

- **Pérdidas en vacío o sin carga:** Son las pérdidas que se relacionan con la excitación del transformador, son las pérdidas en el núcleo la cuales cambian de acuerdo a la tensión de excitación [1].
- **Pérdidas en el cobre o bajo carga:** Son las pérdidas que se generan al suministrar una carga específica, estas se deben a la disipación de calor que se presenta en los devanados del transformador [1].

A continuación, en la figura 2.7, se observan las curvas características de las pérdidas por kilogramo de acuerdo a la inducción alcanzada para cada tipo de lámina:

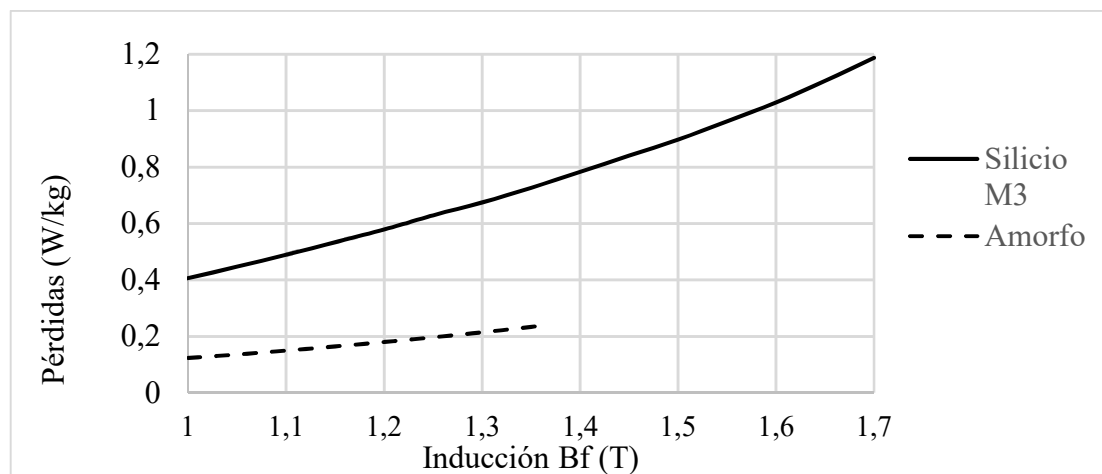


Figura 2.7 Curva comparativa de pérdidas de lámina amorfa vs silicio según inducción.

En la figura 2.7, se detalla que las pérdidas más bajas se representan por la curva característica de la lámina de material amorfo, sin embargo, se encuentra una limitación y es que se satura más rápido que la lámina de acero al silicio.

2.3 Estado del arte

En la actualidad, el crecimiento industrial y poblacional exige que las regulaciones y normativas que abarcan equipos y aparatos tecnológicos que conforman las redes eléctricas, sean cada vez más exigentes. Para el caso de los transformadores eléctricos tanto de distribución como de potencia, donde los equipos son fabricados con diferentes materiales, el diseño se debe realizar de forma tal que permitan alcanzar un alto grado de eficiencia [4].

El acero al silicio con el cual se fabrica de modo convencional la mayoría de los núcleos en transformadores, genera pérdidas relativamente altas, en comparación a otros materiales que empiezan a tener protagonismo en el mercado de las materias primas para estos equipos. Tal es el caso del material amorfo que permite disminuir las pérdidas hasta un 70% en comparación con el acero al silicio, y así logra una disminución significativa en las emisiones de CO₂ lo cual contribuye en gran medida a la preservación del planeta [5].

El material amorfo con el cual se fabrican los núcleos de los transformadores, está compuesto por una variedad de metales y otros elementos tratados químicamente para así lograr las características deseadas. Los metales amorfos se logran gracias a una solidificación rápida donde el metal derretido es súper enfriado en segundos para así lograr que los átomos se ordenen de forma aleatoria o arbitraria. Estos materiales a pesar de ser muy delgados, tienen una gran dureza y resistencia física; además de excelentes propiedades magnéticas, al permitir con facilidad, la magnetización y desmagnetización del mismo [6]. Estas aleaciones se encuentran patentadas por diferentes fabricantes a nivel mundial y corresponden a años de pruebas y ensayos que han permitido establecer estándares o tipos de lámina que industrialmente se comercializan y son referentes al momento de seleccionar una lámina específica [7].

Respecto a los costos, no sólo la selección del material (amorfo o acero al silicio) juega un papel importante, sino que también se tienen variables de diseño con las cuales se pueden lograr eficiencias más altas, pero con inversiones iniciales relativamente más costosas [8] y [9]. El diseño de un transformador con núcleo amorfo puede variar respecto al que se realiza con acero al silicio, por lo tanto, es necesario someter a diferentes pruebas el prototipo

resultante, y a partir de ello establecer criterios propios, tanto dimensionales como de métodos y técnicas [10], [11], [12] y [13].

Gracias a las propiedades que posee el material amorfo, se pueden mencionar cuatro ventajas en el estudio de transformadores de distribución:

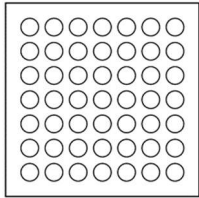
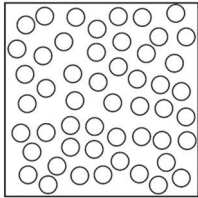
- a) Se reducen las pérdidas generadas por cargas no lineales (armónicos), debido a que las pérdidas en vacío en material amorfo son más bajas que en material de grano orientado, por lo tanto, el calentamiento que se produce por estos armónicos va a ser menor y se prolonga la vida útil de los componentes.
- b) Con este material se logra unas pérdidas más bajas en vacío y como consecuencia de ello, los transformadores serán más eficientes.
- c) Se recupera la inversión a través de los costos de operación en el tiempo.
- d) Se contribuye con el medio ambiente, al reducirse las emisiones de dióxido de carbono [14].

El mejoramiento continuo en el diseño de los transformadores está altamente orientado para reducir las pérdidas en vacío debido a que estas pérdidas son constantes durante la operación del transformador, mientras que las pérdidas bajo carga dependen directamente de la carga que se conecte.

El material amorfo permite mejorar el rendimiento del transformador para aquellos clientes que tengan unos factores de capitalización definidos, pues se reduce las pérdidas en el hierro hasta un 70 % comparadas con los transformadores de acero al silicio. Aunque se aclara que no todos los compradores de transformadores consideran relevantes, las pérdidas que pueden generar los equipos o muchas veces ignoran los costos de estas pérdidas durante la operación del transformador, por lo tanto, en este caso, se adquiere un transformador más económico donde las pérdidas son más altas.

Desde hace más 20 años se han probado y fabricado transformadores con núcleo amorfo, cabe resaltar algunas de las principales características que posee este material en comparación con el acero al silicio, las cuales se pueden observar en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Comparación propiedades eléctricas y físicas de cada lámina.

Propiedades lámina de acero al silicio	Propiedades lámina de material amorfo
<p>Estructura molecular organizada</p> 	<p>Estructura molecular aleatoria</p> 
Espesor de 0,23 mm	Espesor de 0,025 mm
Resistividad eléctrica $0,50\mu\Omega\cdot m$	Resistividad eléctrica $1,20\mu\Omega\cdot m$
Pérdidas en el núcleo normales	Pérdidas en el núcleo aproximadamente 1/3 respecto al acero al silicio

Gracias a las características propias del material amorfo, éste se considera como la mejor solución ante la exigencia de las normas actuales, donde no solo se requiere desarrollar transformadores más eficientes, sino que éstos deben contribuir con el medio ambiente, sin embargo, se debe reconocer que los transformadores de material amorfo poseen una desventaja, ya que estos generan un nivel de ruido mayor en dB en comparación con los núcleos de acero al silicio, el cual se asocia principalmente a tres factores [15]:

- Accesorios que se instalan en el transformador como lo es el ventilador o elementos que no están correctamente instalados o fijados al transformador.
- El efecto de la carga, la cual genera una fuerza electromecánica en los conductores de los devanados, esta puede solucionarse de acuerdo a mejoras en la forma constructiva de las bobinas que cada fabricante adopte.
- El fenómeno de magneto-estricción, se asocia a todos los materiales ferromagnéticos, y en el caso en los transformadores se le conoce como “ruido sin carga” causado por la magnetización y desmagnetización del núcleo, con una frecuencia aproximada de 2 veces, la del sistema en el que opera. Sin embargo, algunos artículos que son objeto de análisis en este proyecto indican que el ruido generado por el metal amorfo que opera a una inducción de trabajo de 1,35T no difiere en forma significativa de un núcleo en acero al silicio, que igualmente opera a una inducción de trabajo típica para el silicio de 1.7T [15]. Actualmente, se realizan estudios sobre el efecto de la magnetoestricción en los transformadores de núcleo amorfo, debido a que estos

núcleos son 2 o 3 dB más ruidosos que los transformadores con núcleo en acero al silicio [16].

Actualmente, se realizan investigaciones enfocadas en la correcta selección de un núcleo magnético y se analizan diferentes opciones de materiales, entre ellas está el material amorfo, pues hay que destacar las características intrínsecas del material para lograr máquinas eléctricas de alta eficiencia.

El material amorfo, en este proyecto se ha enfocado únicamente en los transformadores de distribución, sin embargo, cabe resaltar otros desarrollos que se han realizado con este material hasta la fecha:

- Motores
- Inductores de alta frecuencia
- Transformadores de corriente
- Dispositivos que requieren alta permeabilidad y bajas pérdidas a bajas frecuencias

El uso a nivel mundial de metal amorfo ayuda a reducir la dependencia de combustibles fósiles y crear un medio ambiente más limpio con una mayor calidad del aire. Alrededor de 4 millones de núcleos amorfos han sido vendidos alrededor del mundo. Entre los principales consumidores están: India, China, Japón, Estados Unidos, Brasil y México [21].

Capítulo 3

Análisis de costos y estudio de mercado

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza la selección de los transformadores que se construirán como prototipos que emplean material amorfo, de acuerdo a criterios técnicos y económicos, que permitan comercializarlos en el mercado colombiano. Además, se analiza la normatividad de acuerdo a criterios existentes como la eficiencia, tanto a nivel local como internacional, bajo la cual se pueden diseñar dichos transformadores.

3.2 Análisis de mercado

En la actualidad, el mercado ha generado una demanda hacia los fabricantes de transformadores, en desarrollar productos cada vez más eficientes y más competitivos económicamente, que cumplen con la normatividad existente en cada región o país. Este es el caso del mercado de los Estados Unidos, donde la normatividad energética, se encuentra a cargo del Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés *Department of Energy*), quien tiene como función garantizar la seguridad y el bienestar energético al adoptar políticas, que permitan asumir los desafíos ambientales y nucleares a través de soluciones tecnológicas y científicas [4].

Para el caso del sector de manufactura de transformadores, el DOE se vuelve un referente cuando una empresa desea incursionar en nuevos mercados, pues al construir los transformadores con sus exigentes normas en términos de eficiencia, se convierten implícitamente en productos de alta calidad. El DOE en su último estándar correspondiente al año 2016 [17], ha publicado todos los lineamientos que deben cumplir los productos que intervienen de manera comercial e industrial en la cadena de producción, transmisión y consumo energético de los Estados Unidos. El DOE 2016 exige las eficiencias mostradas en la Tabla 3.1 para transformadores de distribución que cumplen con los siguientes requisitos [17]:

- a. Tienen un voltaje de entrada de 34500 voltios o menor.
- b. Tienen un voltaje de salida de 600 voltios o menor.
- c. Operan a una frecuencia de 60 Hz.
- d. Su potencia se encuentra en el rango de 10kVA a 2500kVA para transformadores sumergidos en aceite.

Nota: Considerar que hay diferentes tipos de transformadores que no están considerados dentro de esta categoría así cumplan con los puntos a, b, c, y d (ej. Autotransformadores, transformadores de aplicación solar, transformadores de puesta a tierra, rectificadores, transformadores de aislamiento, entre otros).

Tabla 3.1 Eficiencias DOE 2016 según potencia

Monofásicos		Trifásicos	
Potencia (kVA)	Eficiencia (%)	Potencia (kVA)	Eficiencia (%)
10	98,70	15	98,65
15	98,82	30	98,83
25	98,95	45	98,92
37,5	99,05	75	99,03
50	99,11	112,5	99,11
75	99,19	150	99,16
100	99,25	225	99,23
167	99,33	300	99,27
250	99,39	500	99,35
333	99,43	750	99,40
500	99,49	1000	99,43
667	99,52	1500	99,48
833	99,55	2000	99,51
		2500	99,53

Nota: El cálculo de los valores de eficiencia definidos en la tabla 3.1 corresponden al 50% de la carga nominal de la placa de características, a una temperatura de referencia de 55°C y un factor de potencia unitario.

3.3 Evaluación de costo materia prima y evaluación de pérdidas

Cumplir con las eficiencias de la tabla 3.1 en transformadores no es relativamente complejo, dado que en la actualidad los programas de diseño incluyen una gran variedad de parámetros que optimizan al máximo los materiales y las diferentes formas constructivas. Sin embargo, en la mayoría de los casos, como las electrificadoras de Norteamérica y algunas de latinoamérica como lo son ENSA (Panamá), EEGSA (Guatemala), WARREN (Puerto Rico), entre otros; realizan una solicitud adicional a los proveedores de transformadores, relacionada no con el precio de venta del transformador, sino con el precio evaluado, es decir, la evaluación de pérdidas a través de los k 's de evaluación. El objetivo de la evaluación de pérdidas es considerar el costo inicial del transformador (costos por materias primas y mano de obra) más un costo de operación (que es la capitalización en el tiempo de las pérdidas en vacío y en carga).

El precio evaluado se representa a través de dos constantes llamadas k 's de evaluación, mediante las cuales se analiza el retorno de la inversión en el tiempo. El precio evaluado se expresa a través de la ecuación (3.1):

$$PE = PV + (Po \cdot k_1) + (Pcu \cdot k_2) \quad (3.1)$$

Donde, PE corresponde al precio evaluado (costo materia prima más costos de operación), Po se refiere a las pérdidas en vacío (W), Pcu equivale a las pérdidas nominales en el cobre (W), PV es el precio de venta del transformador, k_1 es el factor de evaluación de las pérdidas en vacío (\$/W), k_2 es el factor de evaluación de las pérdidas en el cobre (\$/W).

Los factores k_1 como k_2 , son valores dados por los operadores de red y son calculados a partir del análisis estadístico de pérdidas, lo que implica que se debe conocer ampliamente el sistema de distribución existente y entender el comportamiento del mercado energético, para predecir a mediano y largo plazo, los costos en la compra de energía a través de la bolsa u otros medios de mercadeo. Para efectos de este proyecto, el factor k_1 es determinante en el precio evaluado, ya que multiplica las pérdidas en vacío las cuales dependen además de otras variables del tipo de lámina empleada en la construcción del núcleo. Generalmente el factor k_1 puede llegar a ser 2 ó 3 veces más grande que el k_2 , pues está directamente relacionado con las pérdidas en vacío, las cuales son permanentes durante la operación del transformador siempre y cuando esté energizado, por lo que se concluye que la lámina empleada influye directamente en el valor de pérdidas a obtener; mientras que las pérdidas en el cobre son

asociadas al factor k_2 , las cuales dependen de la carga que se conecte al transformador, por lo tanto, no son constantes y no impactan en gran medida los costos de operación del transformador. Esta es una razón, por la cual se debe utilizar una lámina con mejores características, con el fin de obtener unas pérdidas en vacío muy bajas y así llegar a un precio evaluado más atractivo.

En Colombia, la aplicación de la fórmula de evaluación aún no es común, sin embargo, algunas operadoras de red se encuentran realizando los respectivos estudios para determinar costos a partir de los llamados factores de evaluación antes mencionados. De llegarse a dar esta posibilidad dentro de las normativas para instalar transformadores en las redes de distribución, el empleo de transformadores con núcleo amorfo tendría grandes oportunidades, ya que las pérdidas en vacío son significativamente bajas en comparación a los ensamblados con lámina de silicio.

A continuación, se realiza un comparativo para transformadores de 37,5 kVA, 75 kVA y 167 kVA que cumplen con eficiencia DOE-2016, para determinar algunas tendencias según lámina empleada en la construcción del núcleo y forma constructiva de las bobinas de acuerdo a cada potencia. Este análisis se realizó al considerar devanados en aluminio y en la tabla 3.2, se presenta la descripción de las diferentes configuraciones empleadas en dicho comparativo:

Tabla 3.2 Descripción de las abreviaturas de la figura 3.1.

Tipo de núcleo y número de operaciones de la bobina	Tipo de lámina	
	Acero al silicio tipo M3	Material amorfo
Shell type, 2 Operaciones	M3-2OP	AM-2OP
Shell type, 3 Operaciones	M3-3OP	AM-3OP
Core type, 2 Operaciones	M3-CORE	AM-CORE

De acuerdo a lo definido en la tabla 3.2, se representa el análisis económico del costo materia prima donde se consideran los accesorios de cada transformador, el aceite, la forma constructiva del núcleo y bobinas, a través de la figura 3.1:

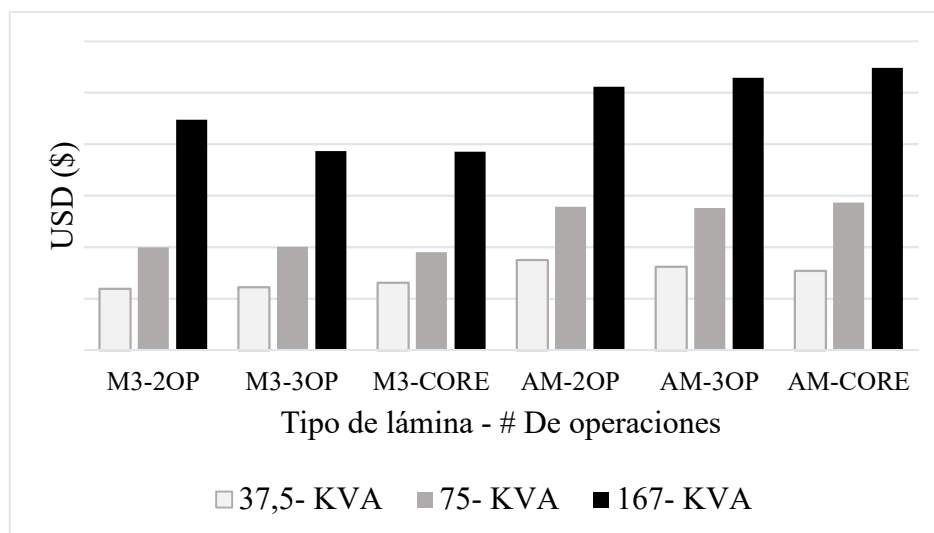


Figura. 3.1 Costo materia prima de transformadores, según forma constructiva

Nota: En el documento, se omiten los valores de los ejes de algunas figuras debido a restricciones propias de la compañía que financió este proyecto.

Se observa en la figura 3.1 que, para transformadores con núcleo amorfo (AM-2OP) (AM-3OP) (AM-CORE), el costo de materia prima aumenta considerablemente respecto a la lámina de acero al silicio. Dicho aumento corresponde en promedio al 35,29% para las potencias mencionadas, lo que inicialmente es una desventaja respecto al uso de lámina en silicio. También se observa, que existe una mínima variación del costo materia prima entre construir un transformador en 2 operaciones donde se elabora la bobina (Baja – Alta) y 3 operaciones donde se elabora la bobina (Baja – Alta – Baja), teniendo en cuenta que, al construir un transformador en tres operaciones, aumentan los tiempos de producción, esto hace que el costo de mano de obra aumente respecto a la forma constructiva en 2 operaciones.

De la figura 3.1, a simple vista se observa que emplear lámina de material amorfo en un transformador no resulta ser atractivo para un operador de red en términos de costo o inversión inicial, debido a que el costo por kilogramo del material amorfo es mayor que la lámina de acero al silicio, sin embargo, al realizar un análisis más detallado de los costos de operación a largo plazo del transformador durante su operación, estos costos son en gran medida atribuidos a las pérdidas en vacío generadas por el tipo de lámina empleada.

Hasta ahora se ha realizado la evaluación costo materia prima en las potencias de (37,5 kVA – 75 kVA – 167 kVA), se toman los factores k_1 y k_2 indicados por un cliente, se aclara que los valores de k_1 y k_2 , utilizados por las compañías, oscilan entre 5 y 10 \$/W para P_o y entre 1 y 2 \$/W para P_{cu} [16], y se reemplazan en la ecuación (3.1), donde se obtiene el precio

evaluado y se representan en las figuras (3.2, 3.3 y 3.4) para cada una de las formas constructivas:

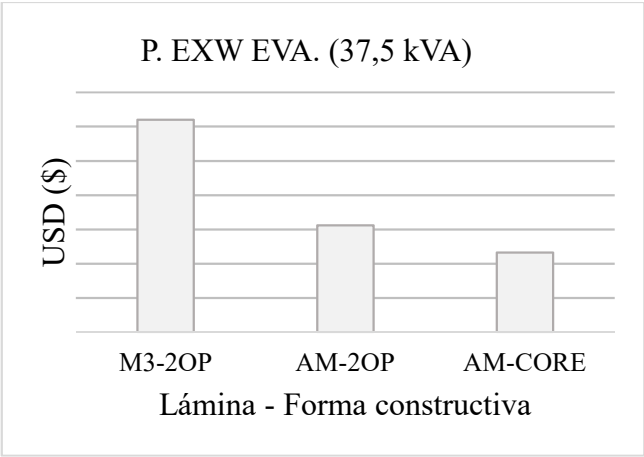


Figura 3.2 Precio evaluado *Ex-work* vs forma constructiva, para el transformador de 37,5 kVA

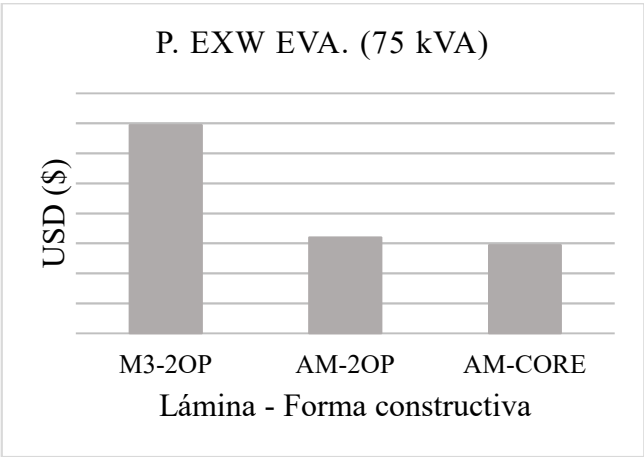


Figura 3.3 Precio evaluado *Ex-work* vs forma constructiva, para el transformador de 75 kVA

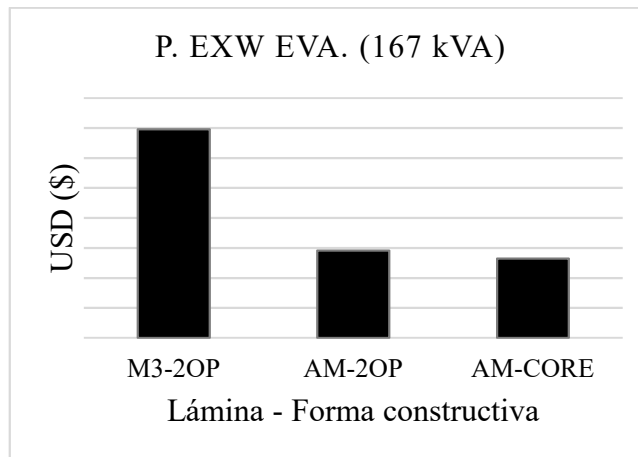


Figura 3.4 Precio evaluado *Ex-work* vs forma constructiva, para el transformador de 167 kVA

El precio evaluado mostrado en las figuras (3.3 a 3.5) son bajo el término incoterm Ex-work, el cual define que la mercancía se entregará en las propias instalaciones del fabricante, obligando al comprador a considerar los trámites de exportación aduaneros por su cuenta. De las figuras (3.3 a 3.5) se encuentra que, en promedio es un **7,5%** más rentable adquirir transformadores con lámina de material amorfo que su contraparte en lámina de silicio. En tal sentido, es más económico para el operador de red o consumidor final, instalar estos transformadores, sin embargo, cabe aclarar que el retorno de la inversión tomará un poco más de tiempo, en comparación con transformadores en lámina de acero al silicio, como se explicará más adelante.

3.4 Costos de operación de transformadores en acero al silicio vs transformadores en material amorfo

Para demostrar el ahorro que se logra en el tiempo, entre un transformador construido con acero amorfo, respecto a uno realizado con núcleo en acero al silicio, basta con compararlos bajo características iguales, de acuerdo al siguiente análisis:

El análisis del costo de operación está directamente ligado a la variación del precio de la energía, por tanto, se realiza un ejercicio, en donde se supone un precio del kW/h en el mes de \$464. Además, se asume que los equipos tendrán una cargabilidad del 75%, para realizar el análisis del retorno de la inversión entre transformadores con núcleo en acero al silicio y transformadores con núcleo de material amorfo, dando cumplimiento a las pérdidas indicadas por la Norma Técnica Colombiana [18], para transformadores monofásicos, además de

emplear la ecuación de costos de operación anual (3.2) que se presenta a continuación, para ambos casos:

$$CO_a = PT \text{ (kW)} \cdot PE \text{ (\$/kWh)} \cdot 24 \text{ (horas/día)} \cdot 365 \text{ (días/año)} \quad (3.2)$$

Donde, CO_a corresponde al costo de operación por año, PT representa las pérdidas totales y PE es el precio de la energía.

Se realiza el cálculo del costo de operación de las pérdidas por año para el transformador de 37,5 kVA, donde se considera lámina de acero al silicio y la lámina de acero amorfo según las características técnicas de la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Características eléctricas transformador de 37,5 kVA con lámina de silicio y lámina en material amorfo

Transformador de 37,5 kVA	Lámina de acero al silicio	Lamina de material amorfo
	Pérdidas NTC	Perdidas estimadas
Pérdidas en el núcleo W:	135	41 (Ver nota)
Pérdidas en el cobre al 100% de la carga W:	405	405
Pérdidas totales al 100% de la carga W:	540	446
Pérdidas en el cobre al 75% de la carga W:	228	228
Pérdidas totales al 75% de la carga W:	363	269

Nota: Las pérdidas en vacío indicadas para lámina de material amorfo se consideran un 70% más bajas, que las pérdidas indicadas para la lámina de acero al silicio [19].

Para el acero al silicio, el costo de operación anual estará definido por la ecuación 3.3:

$$CO_a = 0,363 \cdot 464 \cdot 24 \cdot 365 = 1'475.464 \text{ (\$/año)} \quad (3.3)$$

Posteriormente, se realiza el cálculo del costo de operación de las pérdidas por año para el transformador de 37,5 kVA, se considera lámina de material amorfo y características técnicas indicadas en la tabla 3.2:

$$CO_a = 0,269 \cdot 464 \cdot 24 \cdot 365 = 1'093.388 \text{ (\$/año)} \quad (3.4)$$

Se observa que la diferencia del costo de operación entre ambos transformadores en un año, puede llegar a ser significativa, teniendo en cuenta que resulta ser más económico tener en

operación un transformador con núcleo amorfo que con núcleo de acero al silicio, al lograr evidenciar una diferencia entre ambos de \$382.076 pesos por año, aproximadamente un 26% de ahorro con núcleo en material amorfo. Sin embargo, cabe resaltar que, en su inversión inicial, se tiene un costo más elevado que el de un transformador en acero al silicio, por lo tanto, recuperar ese dinero tomaría más tiempo.

A continuación, se presenta la ecuación 3.5, que permite realizar el cálculo del retorno de la inversión para un transformador, al compararlo con ambas láminas:

$$RIa = \frac{PVA-PVS}{COS-COA} \quad (3.5)$$

Donde, *RIa* corresponde al retorno de la inversión en años, *PVA* es el precio de venta del transformador en material amorfo, *PVS* representa el precio de venta del transformador en acero al silicio, *COS* corresponde al costo de operación del transformador en acero al silicio y *COA* es el costo de operación del transformador en material amorfo.

Para el análisis del cálculo del retorno de la inversión para el transformador de 37,5 kVA, se suponen los siguientes precios de venta de los siguientes transformadores:

Transformador de 37,5 kVA en acero al silicio: 2'400.000 pesos

Transformador de 37,5 kVA en material amorfo: 4'144.000 pesos

Al aplicar la ecuación (3.5) se obtiene:

$$RIa = \frac{4'144.000 - 2'400.000}{1'475.464 - 1'093.388} = 4,5 \text{ años} \quad (3.6)$$

El retorno de la inversión para un transformador de 37,5 kVA fabricado con material amorfo tardaría 4,5 años aproximadamente, aunque hay que reconsiderar que los costos de operación para este transformador a partir de ese momento serán más bajos, comparativamente respecto al transformador fabricado en acero al silicio durante toda su vida útil. Esos costos de operación estarán sujetos a la variación del precio de la energía.

3.5 Análisis de importación de la materia prima y despacho de los transformadores

Una de las desventajas que existe en la actualidad para ser más competitivos en la oferta de transformadores con núcleo en material amorfo, está relacionada con los tiempos de entrega que ofrece el proveedor de la lámina, al considerar que ésta debe importarse. El material tarda aproximadamente en tránsito marítimo 85 días en condiciones normales desde el país de origen. Sin embargo, se aclara que dependiendo de la cantidad requerida, estos tiempos de entrega se pueden mejorar por parte del proveedor de la lámina.

Otro aspecto que influye en el análisis de costos de los transformadores con núcleo amorfo, es su control dimensional, debido a que es posible alcanzar en términos generales menores dimensiones en comparación con el acero al silicio. Esto resulta ser bastante efectivo en algunos casos, en los cuales se cuenta con restricción por parte del cliente u operador de red. En el caso, donde se requiere embarcar los transformadores y transportarlos en contenedor, para el despacho se refleja un ahorro tal como se observa en el siguiente análisis, realizado para la potencia de 167 kVA:

Tabla 3.3 Tabla de cubicaje para transformador 167 kVA.

Tipo de lámina		Silicio	Amorfo	Silicio	Amorfo
Dimensión contenedor		20 pies	20 pies	40 pies	40 pies
kVA		167	167	167	167
Dimensiones	Alto	1,52	1,56	1,52	1,56
	Ancho	1,08	0,99	1,08	0,99
	Largo	1,08	0,92	1,08	0,92
Vol/M Unid.		1,77	1,42	1,77	1,42
Peso Uni/kg		1070	890	1070	890
Unid Cont. 20		10	12	10	12
Tipo de cargue		PISO	PISO	PISO	PISO
Unid Cont. 40		22	26	22	26
Tipo de cargue		PISO	PISO	PISO	PISO
Volumen métrico		17,73	17,05	39,00	36,94
Peso total kg		10700	10680	23540	23140
Cantidad de transformadores		10	12	22	26

Como se observa en el análisis anterior, es posible ubicar una mayor cantidad de transformadores en núcleo amorfo para la potencia indicada en la tabla (167 kVA), en un

contenedor lo que se traduce en un transporte mucho más eficiente en términos de costo, dimensiones o volumen y peso. Sin embargo, para efectos de este proyecto esta potencia queda descartada para desarrollar como prototipo, ya que no corresponde a una potencia comercial y el costo de importación de los lazos sobrepasa el presupuesto.

Capítulo 4

Diseño de prototipos en material amorfo

4.1 Introducción

En este capítulo se establecen los criterios de diseño para transformadores de 37,5 kVA y 75 kVA según dimensiones de los lazos, forma constructiva del núcleo y características eléctricas. Además, se explica el proceso de adquisición del material y las características que finalmente se aceptaron de acuerdo a lo ofrecido por el proveedor.

4.2 Adquisición del material

Al considerar que Colombia no es un país rico en yacimientos, para la extracción de metales pesados y que no se cuenta con la tecnología para procesar este material hasta convertirlo en una lámina con propiedades idóneas, para ser empleado en la industria de los transformadores; se realiza un estudio a nivel internacional para encontrar posibles proveedores, al contemplar el costo y calidad del material, que además permita garantizar una posible reserva de lazos en el almacén, esto último debido al largo tiempo de reposición que pudiese afectar la producción de los transformadores.

Al realizar un proceso de búsqueda de nuevos proveedores, se encuentra la posibilidad de adquirir núcleos de material amorfo ya listos para ser ensamblados ofrecidos por un proveedor extranjero que aplica una mejora sustancial al material amorfo respecto a cómo se comercializaba hace algunos años. Esta mejora consiste en la capacidad de conservar uniformidad y estabilidad mecánica a las láminas, a través de una técnica en la cual se vierte una resina en una sección del lazo como se observa en la figura 4.1.

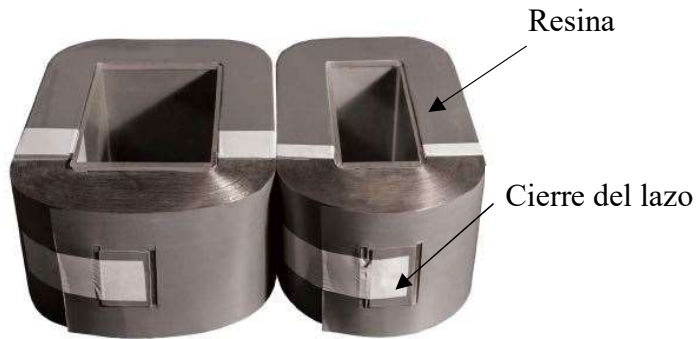


Figura 4.1 Lazos de núcleo amorfo.
(Imagen tomada del catálogo del proveedor)

La figura 4.1 muestra el terminado de cada lazo luego de ser aplicada la resina mencionada y demuestra el compromiso de muchos proveedores para innovar en este producto y así disminuir, en este caso uno de los inconvenientes más comunes y por los cuales se generan críticas hacia el metal amorfo, refiriéndose a la magnetoestricción y que puede ser mitigada con un mejor confinamiento de las láminas que componen el núcleo.

4.3 Forma constructiva y dimensiones

Como se mencionó en el capítulo 2 referente a las propiedades de la lámina amorfa, esta es bastante maleable y de no ser por la resina que es vertida en una sección de cada lazo, se dificultaría la manipulación y por tanto el ensamble. Debido a esta configuración el cierre de los grupos de cada lazo se realiza desde la sección inferior del *ac* como se observa en las figuras 4.1 y 4.2, esta última indica además las dimensiones generales del núcleo.

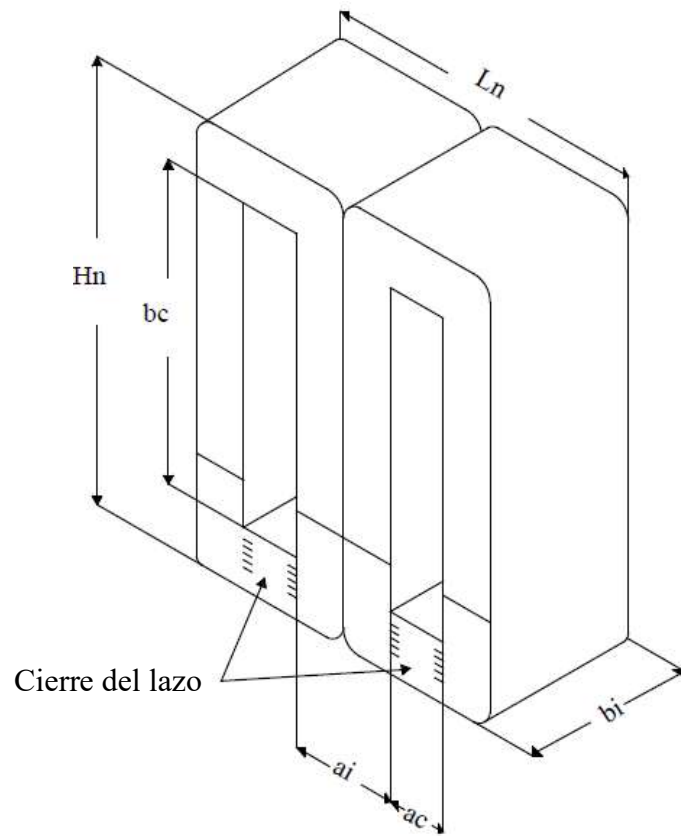


Figura 4.2 Dimensiones generales de los lazos.

Donde, ai corresponde a la suma de dos piernas de cada lazo, bi es la dimensión del corte de rollo madre o profundidad del lazo, ac es el ancho de la ventana interna del lazo, bc es el alto de la ventana interna del lazo, Hn es la altura nominal del lazo y Ln se refiere a la suma nominal del ancho de los lazos que conforman el núcleo.

De acuerdo a la figura 4.2, donde se observan las dimensiones generales del núcleo, es necesario profundizar un poco en la longitud definida como bi , ya que dicha longitud es crucial para muchos fabricantes de transformadores, al considerar que una selección incorrecta del bi , genera desperdicio o retal que en grandes cantidades reflejan mayores costos de fabricación. El bi proviene de un rollo más grande suministrado por los proveedores de las diferentes láminas para la fabricación de los núcleos, este rollo se considera como el "rollo madre". Para el caso particular de acero al silicio, cuando este "rollo madre" llega a fábrica, se le realiza diversos cortes transversales generando diferentes longitudes o bi 's como se observa en la figura 4.3:

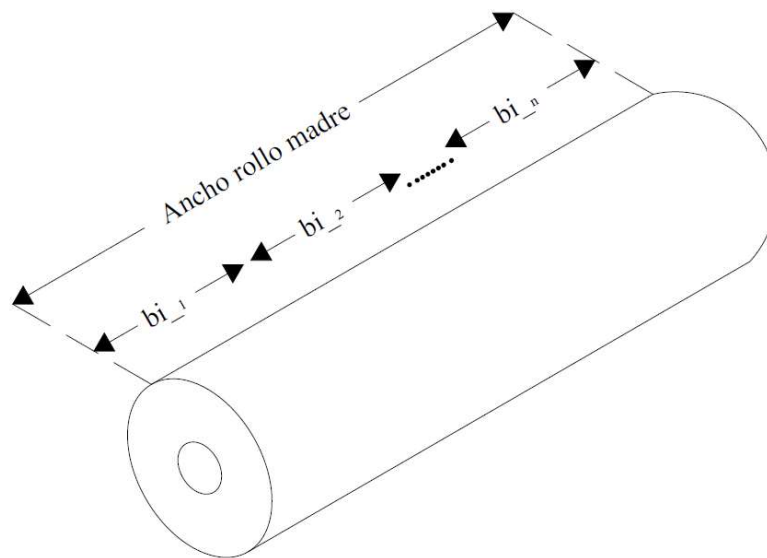


Figura 4.3. Corte de rollo madre según bi

Al considerar entonces que las láminas de cada lazo deben cortarse a partir de grandes rollos, al igual que se hace con láminas de silicio, en algunas ocasiones, se corre un riesgo de generar retal, que en grandes cantidades representan un mayor desperdicio. Es por ello que casi todos los fabricantes de transformadores y núcleos deciden estandarizar el ancho o bi en los lazos del núcleo. Para el caso del material amorfo, es el proveedor de la lámina quién tiene estandarizado los bi 's, ya que es quien realiza el corte y los ofrece en tres longitudes posibles: 5,6" (142mm); 6,7" (170mm) y 8,4" (213mm).

Luego de analizar diferentes potencias, durante el análisis económico (capítulo 3) y a partir del método de ensayo y error, se encontró una tendencia en el bi para ser empleada según kVA requerido, la cual debe ser validada, pues no es 100% seguro para cada diseño en particular. Estas corresponden a lo indicado en la tabla 4.1:

Tabla 4.1 kVA aproximado para diseño.

bi (mm)	Posible kVA de diseño
142	Desde 10 hasta 25
170	Desde 25 hasta 75
213	Desde 75 hasta 167

Como se observa en la tabla anterior, el proveedor del material ofrece en su portafolio, la posibilidad de estandarizar las dimensiones de los lazos. Esto representa una ventaja al pretender adquirir este producto en grandes cantidades, si es que se desea tener reserva de unidades en bodega. Sin embargo, por otra parte, esto limita las posibilidades de diseño y

obliga a ajustar otro elemento fundamental que compone la parte activa del transformador, se trata de las bobinas. Debido a que la inducción de diseño del núcleo es proporcional a la cantidad de espiras y calibre del conductor; allí se debe conservar un sensible equilibrio según la ecuación fundamental del transformador (4.1).

$$B_f = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot S_n \cdot N} \text{ (Gauss)} \quad (3.1)$$

Donde, B_f corresponde a la inducción magnética en el núcleo (Gauss), E es el nivel de tensión eficaz del transformador (V), f se refiere a la frecuencia del sistema (Hz), S_n es el área de la sección transversal del núcleo (cm²) y N es el número de espiras de la bobina.

De la ecuación 4.1, se observa que la inducción es inversamente proporcional a la sección transversal del núcleo y la cantidad de espiras que componen la bobina, debido a que la sección transversal del núcleo está limitada por las dimensiones ofrecidas por el proveedor, el número de espiras en la bobina se convierte en la única variable con la que se puede ajustar no solo la inducción magnética de trabajo, sino también las pérdidas bajo carga y valor de impedancia. Considerando que dichas pérdidas no pueden sobrepasar los límites de la eficiencia establecida por DOE y que la impedancia también se encuentra limitada por un valor máximo dado por norma.

Al pretender obtener los mejores resultados posibles desde diseño, se logran variaciones muy leves que no difieren en comparación con transformadores con núcleo en acero al silicio, tal como se observa en la figura 4.4, donde se muestra de acuerdo a cada forma constructiva y potencia el volumen ocupado por el transformador.

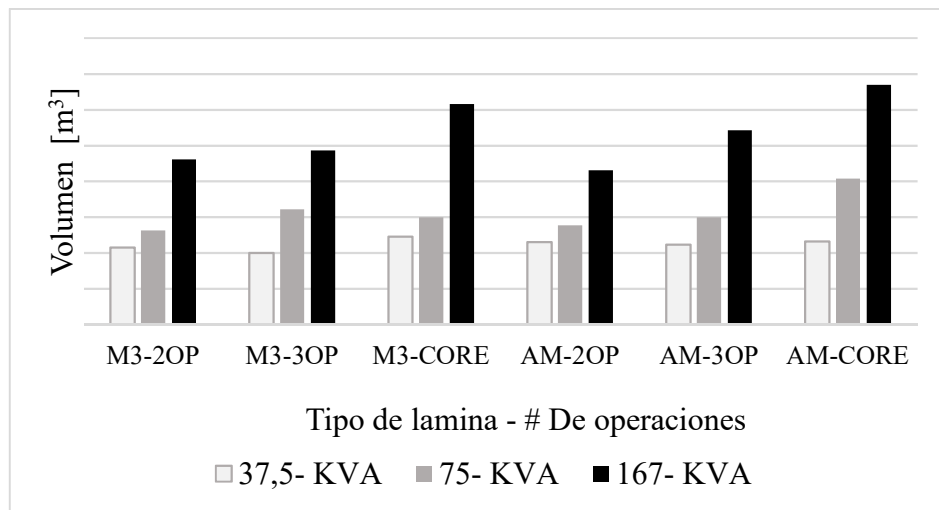


Figura 4.4 Volumen ocupado por cada tipo de transformador según potencia.

Finalmente se considera para la etapa de diseño, emplear aislamientos en papel epóxico clase A (105°C), material de los devanados en aluminio de dos operaciones y núcleo tipo acorazado.

4.4 Parámetros eléctricos de los transformadores

Para obtener el diseño, es necesario definir algunos parámetros que se deben cumplir de acuerdo a la norma NTC, sin embargo, las pérdidas máximas no son restringidas, ya que se esperan resultados que cumplan con eficiencia DOE 2016. Todos estos parámetros son las variables de entrada del programa como se indican en la tabla 4.2, para generar el diseño de los prototipos.

Tabla 4.2. Parámetros de diseño

kVA	V _p	V _s	Z _{cc} %	Tap's	DOE 2016 (%)	Material de devanados(AT-BT)
37,5	13200Y / 7620	120 / 240	3	3 ± 2,5%	≥ 99,05	Aluminio-Aluminio
75	13200	120 / 240	3	3 ± 2,5%	≥ 99,19	Aluminio-Aluminio

Para cumplir la eficiencia DOE requerida en los transformadores, tal como se indicó en el capítulo 3, depende inicialmente de las pérdidas en el núcleo P_o y las pérdidas en los devanados P_{cu} ; sin embargo las P_o que se obtienen a partir de la curva de excitación son ideales, según el tipo de lámina empleada, y es por ello que se debe considerar un valor adimensional conocido como *factor de destrucción*, el cual considera los efectos nocivos asociados al estrés mecánico durante ensamble, transporte, aspectos particulares y propios del material que permite ajustar desde el diseño, las P_o reales estimadas. El proveedor de los lazos recomienda emplear para la etapa de diseño y pérdidas esperadas un factor de destrucción de 1,5. Así mismo se somete a prueba este valor (que será validado en el capítulo 6).

Para obtener el diseño definitivo se consideran diferentes variables, todos estos parámetros son ingresados a determinados programas de diseño, que como se mencionó antes, ya son comunes en grandes compañías fabricantes de transformadores, este programa ejecuta un algoritmo que recibe dichas variables o parámetros de entrada y de allí se obtiene a partir de múltiples iteraciones diferentes posibilidades que pueden ser considerados como diseños probables de fabricación; la selección del diseño definitivo, se realiza enfocándose en otras variables menos técnicas pero que de igual modo puede significar una decisión crítica, entre estas últimas consideraciones están: el costo final del transformador, la materia prima disponible y la productividad o tiempo de fabricación.

Como se mencionó en el párrafo anterior, después de iterar diferentes posibilidades, que comprenden no solo el cumplimiento de las características antes mencionadas, sino también el costo del transformador, se obtienen los siguientes valores esperados por diseño:

Tabla 4.3 de valores obtenidos por diseño.

kVA	Po (W)	Inducción (Gauss)	Pcu (W)	Io (%)	Eficiencia (%)
37,5	28,5	13596	665	0,13	99,11
75	49,5	13574	1118	1,39	99,24

Nota: Los datos finales de diseño obtenidos en la tabla 4.3 cumplen impedancia y corriente de excitación según NTC 818 – 1995, mientras que las pérdidas se determinan según cumplimiento de eficiencia DOE 2016.

4.5 Selección de los lazos

Después de completar la etapa de diseño, se traduce la información obtenida en la figura 4.5 y tabla 4.4 que permita al proveedor del material amorfo, identificar dimensional y eléctricamente lo requerido desde el software de diseño:

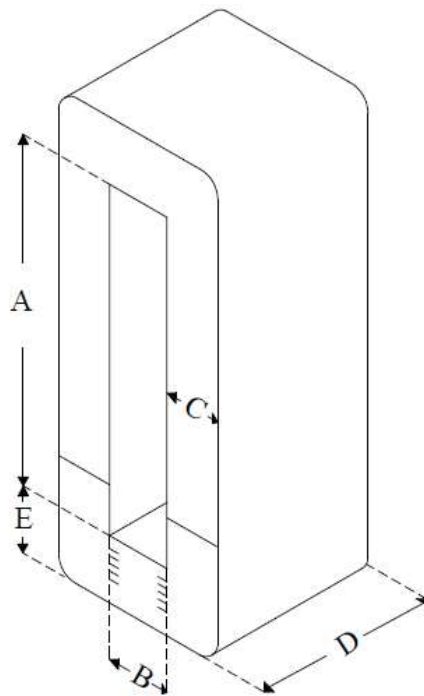


Figura 4.5 Dimensiones del lazo.

Tabla 4.4 Información requerida por el proveedor.

LONGITUD PROVEEDOR	ESTANDAR TIPICO
A	<i>bc</i>
B	<i>ac</i>
C	<i>ai/2</i>
D	<i>bi</i>
E	Longitud establecida por el proveedor.
PESO	kg

Posteriormente, después de encontrar el diseño ceñido a lo requerido y realizar la respectiva solicitud, el proveedor envía un protocolo en el cual se expresan los valores finales que se pueden garantizar desde la fabricación para cada lazo. Esto con el fin de realizar control de calidad a la llegada del material y realizar los ajustes al diseño final incluyendo parte mecánica. Dicha información contempla datos eléctricos y dimensionales de cada lazo. Ver Tabla 4.5 y 4.6:

Tabla 4.5 Características de diseño para TR de 37,5kVA

Transformador 1	Serial	bc	ac	ai/2	bi	Hn	Peso	Io	Po
	lazo	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)	(A)	(W)
	37,5-1	352	62,87	57,4	174	487,6	64,2	0,415	11,7
	37,5-2	352	63,3	57,5	174	487,7	64	0,528	15,2

Tabla 4.6 Características de diseño para TR de 75kVA

Transformador 2	Serial	bc	ac	ai/2	bi	Hn	Peso	Io (A)	Po (W)
	lazo	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg)		
	75-1	410	60,2	71,2	217	576,5	111,8	0,618	23,5
	75-2	11	60,4	71	217	177,3	112,8	0,537	22,9

Nota: Los valores indicados en las tablas 4.5 y 4.6 corresponden a resultados en cada lazo probado.

Después de verificar una vez más las dimensiones garantizadas en los lazos, por parte del proveedor, se procede a reajustar los diseños, de acuerdo a las nuevas dimensiones y peso, donde se encuentra que estos nuevos diseños no varían en resultados respecto a los iniciales.

Capítulo 5

Proceso de ensamble de la parte activa

5.1 Introducción

Se definen los criterios de ensamble para los transformadores de núcleo amorfo con el soporte técnico que ofrece el proveedor de la lámina y se da seguimiento a cada una de las etapas de producción, que van desde la inspección de calidad durante la recepción, el ensamble de las bobinas y el núcleo, hasta el proceso de encube.

5.2 Recepción del material

Cuando se reciben los lazos por parte del proveedor, se realiza la inspección física por el área de calidad, donde se comparan los valores eléctricos de pérdidas y corriente de excitación garantizados por el proveedor de la lámina de material amorfo, tal y como se indican en las tablas 4.5 y 4.6 del capítulo 4. El resultado de esta inspección, se relaciona en la tabla 6.1 y 6.2. A continuación, en la figura 5.1 se observa la forma en que llegan empacados los lazos de material amorfo, lo ideal es que mientras no se usen se deben conservar de esta manera para protegerlos de cualquier agente contaminante y alargar más la vida útil de los mismos.



Figura 5.1 Recepción de los lazos amorfos.

Después de lo observado en la figura 5.1 y al retirar los lazos del huacal, se encuentra que estos sufren un desprendimiento de material como se observa en la figura 5.2, la cual puede afectar el factor de destrucción.



Figura 5.2 Alteraciones en el material.

De acuerdo a lo observado en la figura 5.2 se solicita aclaraciones con el proveedor de la lámina de material amorfo, de allí se obtiene como respuesta que la mala manipulación o reprocesos de ensamble, pueden generar un aumento en la pérdida de propiedades electromecánicas del material, tal como se evidenciará más adelante en este proyecto, y por ende requiere para dichos casos un replanteamiento o recalcado de un nuevo factor de destrucción para cada caso particular.

Finalmente, luego de ser validada la información por parte del área de calidad indicada en las tablas 4.5 y 4.6 del capítulo 4, aparte del estado físico de los núcleos, se procede a probar los lazos en el banco de prueba mostrado en la figura 5.3 para que finalmente sean puestos a disposición del área de producción.



Figura 5.3 Inspección de calidad

Los resultados obtenidos en el banco de prueba para los lazos, se resumen en la tabla 6.1 y 6.2, se establece que no se presentan variaciones considerables entre lo ofrecido por el proveedor y lo esperado por diseño.

5.3 Criterios para el ensamble

Emplear núcleos de material amorfo, implica reducir procesos y tiempos de fabricación, ya que la lámina no debe recocerse y el agrupamiento de las láminas en el entrehierro es menos traumático para la compañía que desee implementarlo; también es cierto, que se deben considerar otras tareas adicionales, estos nuevos requerimientos de fabricación afectan principalmente el proceso de ensamble ya que la metodología a emplear es diferente y se deben considerar dos aspectos muy importantes para la ejecución de dicho ensamble:

- El emparejamiento de los lazos consiste, en que cada núcleo se debe ensamblar con un par de lazos ya definidos y no se puede alterar esta asignación. Dicha asignación o emparejamiento de lazos se encuentra definida por el proveedor de la lámina, por lo tanto, el proveedor suministra seriales, los cuales se deben tener en cuenta al momento del ensamble. En caso de no realizar correctamente el emparejamiento, los protocolos suministrados por el proveedor no coincidirán, esto se reflejará en variaciones de: peso, dimensiones, corriente de excitación, pérdidas y como consecuencia afectando el proceso. Y para el caso de un transformador ya en ensamblado, esto puede generar un desequilibrio de carga.

- Se debe fabricar una herramienta llamada canal en U, la cual permite el ingreso de las bobinas por las piernas que suman el a_i del núcleo, ver figura 5.4.

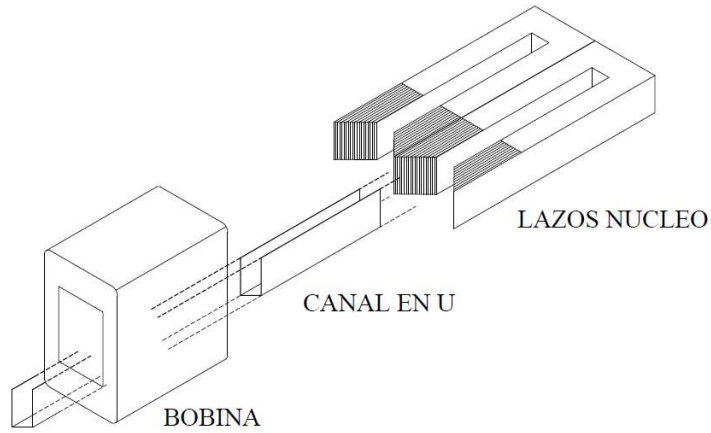


Figura 5.4. Ensamble con canal en U.

Para cada caso específico se deberá fabricar una única canal en U, lo que se traduce en una posible desventaja, y por ello a medida que evolucionen los métodos de ensamble, quizá se encuentre una mejor solución que sea más eficiente para el proceso. El uso de esta canal en U, implica también, considerar tolerancias que permitan un ensamble menos traumático como se indica en la figura 5.5:

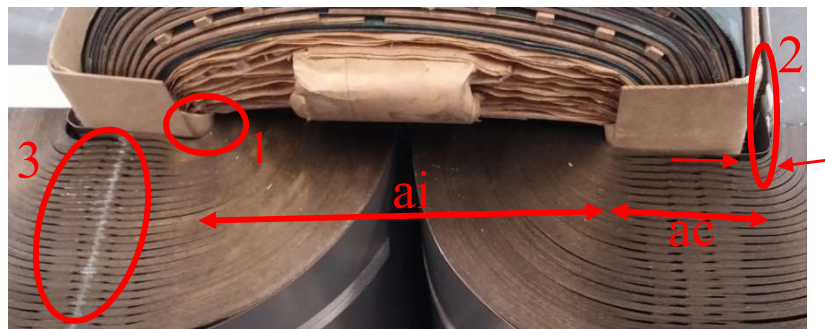


Figura 5.5. Visualización de los aislamientos BT-núcleo.

Donde cada numeral corresponde a:

- El numeral 1 de la figura 5.5 representa el aislamiento entre la baja tensión y el núcleo. Este aislamiento está compuesto por uno o varios cartones (dependiendo del kVA y nivel de tensión del devanado de baja tensión).

- El numeral 2 de la figura 5.5 representa la tolerancia en el ac y bc para facilitar el proceso de ensamble y evitar inadecuada manipulación de la parte activa o que esta sea sometida a esfuerzos mecánicos inapropiados dentro del proceso.
- El numeral 3 de la figura 5.5 representa la guía que se debe dibujar en el entre-hierro por parte de los operarios para permitir la facilidad del agrupamiento de los cierres de los lazos en menor tiempo. Esta técnica permitió agilizar el proceso, reduciendo aproximadamente 10 minutos el ensamble del lazo comparado con su par. Como se muestra en la figura 5.6:



Figura 5.6 Agrupamiento de láminas.

5.4 Criterios para el aterrizaje del núcleo

Se garantiza el aterrizaje del núcleo mediante una lámina de fleje en cobre que genera contacto entre los cierres de cada lazo con el fin de reducir las corrientes parásitas que afectan las pérdidas y corriente de excitación en el núcleo como se muestra en la figura 5.7 y 5.8:

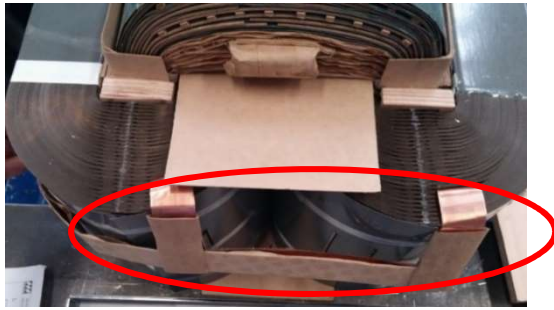


Figura 5.7 Aterrizaje del núcleo



Figura 5.8 Lámina de aterrizaje del núcleo

Luego, esta lámina de fleje se fija de un punto de la brida como se muestra en las figuras 5.9 y 5.10:



Figura 5.9 Con tipo de brida 1
(Tapa-Fondo con núcleo flotante)



Figura 5.10 Con tipo de brida 2
(Convencional en U con núcleo flotante)

Al llevar a cabo el encube de la brida, ésta se fija de forma sólida al tanque, con el fin de obtener una estructura sólidamente aterrizada.

5.5 Diseño de la brida

El confinamiento final de la parte activa se realiza con una brida que permita mantener el núcleo flotante en su interior (es decir, el núcleo no se encuentra en contacto con la brida), lo cual es diferente a como convencionalmente se realiza ya que esta nueva estructura permite que la parte activa (bobina y núcleo) sea soportada básicamente solo por la bobina. Esto se puede apreciar mejor en brida tipo tapa-fondo como se observa en las figuras 5.11 y 5.12:



Figura 5.11 Parte superior brida



Figura 5.12 Parte inferior brida

Luego de finalizado el ensamble de la parte activa, se procede a realizar el horneado de la misma y posteriormente se realiza el proceso de encube, el cual es de forma estándar y con los mismos criterios establecidos para transformadores convencionales.

Capítulo 6

Pruebas de rutina

6.1 Introducción

Al finalizar el ensamble y encube de los transformadores de 37,5kVA y 75kVA descrito en el capítulo 5, se procede a realizar las siguientes pruebas de rutina:

- Medición de polaridad y relación de transformación
- Medición de la corriente de excitación y pérdidas en vacío
- Medición de pérdidas bajo carga
- Medición de la impedancia
- Tensión aplicada
- Tensión inducida

6.2 Resultados pruebas de rutina

Luego de tener los transformadores terminados, se realiza por parte del área de calidad las siguientes pruebas de rutina:

- Tensión aplicada: Esta prueba consiste, en verificar que la clase y cantidad de material aislante sean adecuados, con el objetivo de asegurar que el transformador resistirá los esfuerzos eléctricos a los que se verá sometido durante su operación. Se somete el transformador a nivel de tensión de prueba de 34kV, durante 60 segundos y a una frecuencia inferior al 80% de la nominal y otras exigencias de acuerdo a lo establecido bajo la norma técnica colombiana NTC 837-1997. De allí se obtiene para ambos transformadores resultados satisfactorios.
- Tensión inducida: Esta prueba, consiste en verificar si el aislamiento entre espiras, capas y secciones de los devanados del transformador, son de la calidad requerida así como el verificar el aislamiento entre bobinas y entre devanados a tierra. Se energiza el transformador a 2 veces la tensión nominal del devanado secundario y al doble de la frecuencia durante 60 segundos. De allí se obtiene para ambos transformadores resultados satisfactorios.

A continuación, se resume en las siguientes tablas otros resultados obtenidos durante las pruebas de rutina, así mismo se compara con lo esperado por diseño y con el valor medido antes de realizar el ensamble. Ver tablas 6.1 y 6.2:

Tabla 6.1 Resultados obtenidos TR 37,5 kVA

SERIAL - LAZO		1	2
bc (mm)	Proveedor	352	352
	Medición pre-ensamble	345	345
ac (mm)	Proveedor	62,8	63,3
	Medición pre-ensamble	65	65
ai/2 (mm)	Proveedor	57,4	57,5
	Medición pre-ensamble	58	58
bi (mm)	Proveedor	174	174
	Medición pre-ensamble	170	170
PESO (kg)	Proveedor	64,2	64
	Medición pre-ensamble	64	64
Io (A)	Proveedor	0,415	0,528
	Medición (a) pre-ensamble	0,235	
	Esperado x diseño %	0,13	
	Medición % post-ensamble	0,128	
Po (w)	Proveedor	11,7	15,2
	Medición pre-ensamble	27	
	Esperado x diseño	28,5	
	Medición post-ensamble	28,05	
DOE 2016 Norma		99,05%	
DOE 2016 Medición final		99,17% CUMPLE	

Tabla 6.2 Resultados obtenidos TR 75 kVA

SERIAL - LAZO		1	2
bc (mm)	Proveedor	410	411
	Medición pre-ensamble	405	405
ac (mm)	Proveedor	60,2	60,4
	Medición pre-ensamble	61	61
ai/2 (mm)	Proveedor	71,2	71
	Medición pre-ensamble	70	70
bi (mm)	Proveedor	217	217
	Medición pre-ensamble	215	215
PESO (kg)	Proveedor	111,8	112,8
	Medición pre-ensamble	112	112
Io (A)	Proveedor(a)	0,618	0,537
	Medición (a) pre-ensamble	0,593	
	Esperado x diseño %	0,12	
	Medición % post-ensamble	0,180	
Po (w)	Proveedor	23,5	22,9
	Medición pre-ensamble	48	
	Esperado x diseño	49,5	
	Medición post-ensamble	46,6	
DOE 2016 Norma		99,19%	
DOE 2016 Medición final		99,26% CUMPLE	

- Los resultados permiten observar que los transformadores de 37,5 kVA y 75 kVA, de acuerdo a las tablas de resultados 6.1 y 6.2, logran cumplir con eficiencia DOE 2016.
- Las dimensiones ofrecidas y las finalmente medidas no representan grandes variaciones.
- Existe una pequeña variación en el peso de los lazos y al considerar que el costo de cada lazo es proporcional a su peso, además de que todo transformador izado al poste debe cumplir peso máximo, es necesario solicitar al proveedor una mejor medida que permita desde diseño optimizar costos y predecir mejor dimensionamiento del transformador.
- El transformador de 75kVA evidencia un alza en pérdidas en vacío debido al estrés mecánico alcanzado, ya que esta unidad se ensambló en dos oportunidades con el fin de mejorar criterios de diseño, aún así se da cumplimiento a la eficiencia DOE 2016.

- La corriente de excitación obtenida en los lazos durante el pre-ensamble, es mayor a la finalmente medida con el transformador ya terminado, esto se debe a que, durante el pre-ensamble, las láminas de los lazos no se encuentran correctamente alineadas en el cierre, y es una consecuencia de la maleabilidad de la lámina. El obtener una corriente de excitación más baja evidencia que el núcleo ha sido correctamente confinado durante el proceso de ensamble.
- Se obtiene la siguiente curva de excitación, según figura 6.1 para el transformador de 75kVA:

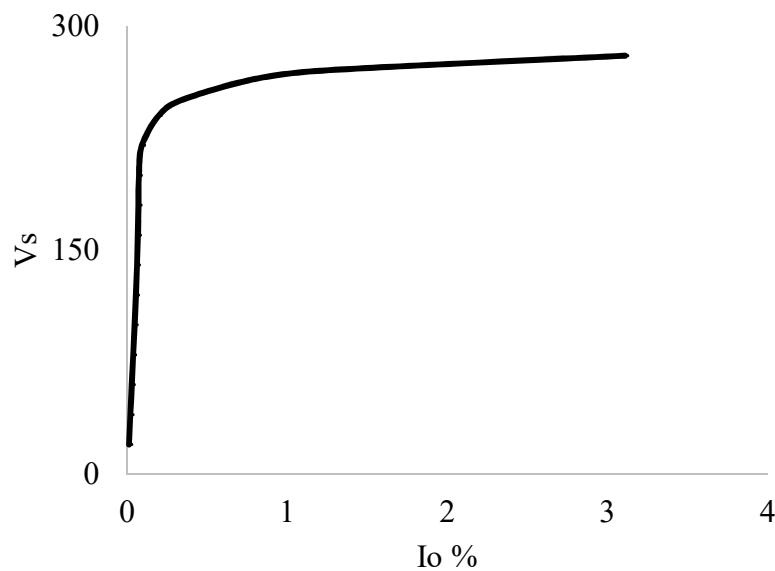


Figura 6.1 Curva de excitación para TR de 75kVA

Finalmente, los resultados de los prototipos que se llevaron a cabo, son satisfactorios y se autoriza la fabricación de transformadores con núcleo de material amorfo.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos en el análisis de costos del capítulo 3 de este proyecto, demuestran que existe un reto a nivel comercial para un nuevo producto como lo sería el transformador de núcleo con material amorfo, pues no solo se debe considerar un cambio en cuanto a normas de regulación, sino que se debe convencer a cada cliente de los beneficios a largo plazo y más importante aún del impacto a nivel ambiental que implicaría una implementación en grandes cantidades de estos transformadores.
- El costo en materia prima de un transformador con núcleo en material amorfo es mayor que un transformador con núcleo en acero al silicio. Sin embargo, el análisis de costo evaluado de un transformador con núcleo en material amorfo, demuestra la viabilidad y la rentabilidad a largo plazo al instalar esta tecnología en la red eléctrica. Pues al considerar que el costo de materia prima es mayor en transformadores con núcleo de material amorfo, el retorno de la inversión también es mayor.
- La viabilidad comercial de emplear transformadores con núcleo de material amorfo está sujeta a que, en la fórmula de costo evaluado o fórmula de evaluación de pérdidas, el factor k_l (factor de pérdidas en vacío) sea considerablemente alto, como para entender y comprender el impacto en costo a largo plazo. Se entiende entonces que la sola existencia de una fórmula de evaluación de pérdidas en una norma específica, no garantiza obtener del transformador con núcleo de material amorfo sus mejores características ó sacar su mejor provecho; y en este último caso sería mejor emplear transformadores con núcleo de acero al silicio, tal como sucede en la actualidad.
- De acuerdo a resultados obtenidos en el capítulo 6 de este proyecto, y la experiencia resumida en los capítulos 4 y 5, es posible indicar que técnicamente la implementación de núcleos con material amorfo no conlleva a introducir grandes cambios al proceso, por el contrario, las operaciones se reducen y los tiempos de

ensamble tienden a disminuir en forma considerable, por lo tanto, se afecta favorablemente los costos indirectos de fabricación.

- En términos generales las dimensiones, peso y características eléctricas de los lazos ofrecidos por el proveedor corresponden con lo finalmente obtenido en laboratorio y se establece que cada reproceso en el ensamble de un transformador, puede significar una disminución en las propiedades eléctricas de los mismos, se recomienda evitar dichos reprocesos. Sin embargo, el análisis de pérdidas obtenidos en laboratorio permite concluir que los transformadores cumplen con eficiencia DOE 2016.

7.2 Trabajos futuros

Se plantea:

- Fabricar nuevos prototipos de transformadores con núcleo amorfo, para estudiar niveles de ruido asociados a este material.
- Fabricación de transformadores de distribución trifásicos, donde se empleen núcleos de material amorfo.
- Análisis de prueba de cortocircuito.
- Fabricar nuevos prototipos de transformadores con núcleo amorfo, sumergidos en aceite vegetal.

Bibliografía

- [1] Norma Técnica Colombiana 317. Electrotecnia. Transformadores de potencia y distribución. Terminología, Colombia, 25 de noviembre de 1998.
- [2] R. Ocón. (2011, Jun 14). Temas Selectos de Transformadores de Potencia [Online]. Available: <http://www.cigre.org.mx>
- [3] E. J. Toledo, M.O. Oliveira, O. E. Perrone, J. H. Reversat y R. S. Orellana Paucar. “Análisis de Ferro Resonancia en Transformadores de Tensión Inductivos para uso Metrológico”, Conference Paper, septiembre de 2012.
- [4] K. Soltanzadeh, A. Tavakoli and P. B. Arbab, “Effects of Amorphous Core Distribution Transformers in Improvement the functioning of the Electricity Distribution System,” [Electrical Power Distribution Networks \(EPDC\), 2012 Proceedings of 17th Conference on](#), May. 2012, IEEE, pp. 1-7.
- [5] Y. Chang, C. Hsu, H. Chu and C. Tseng, “Magnetomechanical Vibrations of Three-Phase Three-Leg Transformer With Different Amorphous-Cored Structures,” [IEEE Transactions on Magnetics](#), vol. 47, no 10, pp. 2780 – 2783, 2011.
- [6] R. P. Ruiz, J. C. Olivares, E. C. Littlewood and M. S. Esparza, “Transformadores de Distribución con Núcleos de Material Amorfo,” *Conciencia Tecnológica*, No. 38, pp. 18 – 23, Julio – Diciembre 2009.
- [7] H. W. Ng, R. Hasegawa, A. C. Lee And L. A. Lowdermilk, “Amorphous Alloy Core Distribution Transformer,” [Proceedings of the IEEE](#), vol. 79, no. 1, pp. 1608 – 1623, 1991.
- [8] B. Francoeur and P. Couture, “Low-Cost Amorphous-Metal Rolled-up-Core Distribution Transformer,” [Transmission and Distribution Conference and Exposition \(T&D\), 2012](#), pp. 1-7.
- [9] A. Eliasson, H. Elvfang, V. R. Ramanan, “Amorphous Metal Core Material Shows Economic and Environmental Benefits when Pre-existing Transformers are to be Replaced within Vattenfall Group’s Distribution Network,” [2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe \(ISGT Europe\)](#), 2010, pp. 1-7.

- [10] J. M. Yamamoto, T. Mori, T. Kawasaki, K. Tsutsui, T. Itoh and T. Yagisawa, “A Design Study of Amorphous Core Transformer,” [IEEE Transactions on Magnetics](#), vol. 20, no. 5, pp. 1771 – 1773, 1984.
- [11] P. L. Waldon, “Evaluation Of Electrical Insulation Exposed To Amorphous Metal Transformer Core Annealing Temperature,” EIC 17th Electrical Electronics Insulation Conference, 1985, pp. 205 – 213.
- [12] G. Segers, A. Even and M. Desmedt, “Amorphous Core Transformers: Behaviour In Particular Network Conditions And Design Comparisons,” [Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on \(IEE Conf. Publ. No. 438\)](#), 1997, pp. 5/1 – 5/5.
- [13] N. Kobayashi, N. Aoki, H. Horie, Y. Baba, Y. Sano, H. Kimura, and C. Konagai, “High-Voltage And Short-Rise-Time pulse-Transformer With Amorphous Cores,” [Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International](#), 1997, vol. 2, pp. 1620 – 1625.
- [14] K. Soltanzadeh, A. Tavakoli and P. Bozorgzad, “Effects of Amorphous Core Distribution Transformers in Improvement the functioning of the Electricity Distribution System”, 2012 Proceedings of 17th Conference on electrical Power Distribution, May. 2012.
- [15] D. Azuma and R. Hasegawa, “Audible Noise From Amorphous Metal And Silicon Steel-Based Transformer Core”, 2008, vol 44, pp 4104–4106.
- [16] V. R. Ramanan, M Carlen, “La Distribución Apuesta Por el Verde”, Revista ABB 2112, 2012, pp 40–47
- [17] DOE, 10 CFR PART 431, subpart K, Energy Efficiency Program for Certain Commercial and Industrial Equipment, 2016.
- [18] Norma Técnica Colombiana 818. Transformadores Monofásicos Auto refrigerados y sumergidos en líquido. Corriente sin carga, perdidas y tensión de cortocircuito, Colombia, 29 de noviembre de 1995.
- [19] S. Yurekten, A. Kara, K. Mardikyan, “Energy Efficient Green Transformer Manufacturing with Amorphous Cores”, International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Madrid, October 2013.

[20] Norma Técnica Colombiana 1490. Electrotecnia, accesorios para transformadores monofásicos de distribución con potencias entre 5 kVA y 167 kVA, tipo poste. Terminología, Colombia, 17 de agosto de 2016.

[21] Amorphous metal distribution transformers, Metglas, Inc, Conway, South Carolina, United States.